

激光诱导击穿光谱对绝缘子污秽元素组成和含量的快速原位检测

陈道品, 邱明明, 石 俏*, 徐远科, 时云月

广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月10日; 发布日期: 2025年8月21日

摘 要

绝缘子污秽检测对电力系统安全、稳定运行意义重大, 传统测污方法存在操作不便、无法在线原位检测等问题。本研究将激光诱导击穿光谱(LIBS)技术应用于绝缘子污秽元素组成及含量的检测, 构建远程检测系统, 在3米距离下对绝缘子样品表面多点位进行激光激发, 获取光谱信息并开展定性定量分析。结果显示, LIBS系统可非接触式有效测定污秽中的Al、Si、Na、Mg、Ca等多种元素, 通过标准曲线法实现元素定量分析, 各元素定量曲线的 R^2 均超过0.85, 对Ca及Mg元素的定量相对标准偏差分别为5.58%及9.78%。基于污秽成分量化分析, 能够构建以元素成分为基础的污秽治理与溯源技术体系, 结合区域环境数据可解析污染源分布及迁移规律, 为电力系统防污闪方案设计与区域环境污染综合治理提供科学决策依据。

关键词

激光诱导击穿光谱, 绝缘子污秽, 元素分析, 定量分析

LIBS for Rapid *In-Situ* Detection of the Composition and Content of Insulator Fouling Elements

Daopin Chen, Mingming Qiu, Qiao Shi*, Yuanke Xu, Yunyue Shi

Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan Guangdong

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 10th, 2025; published: Aug. 21st, 2025

Abstract

The detection of insulator fouling is of great significance for the safe and stable operation of power

*通讯作者。

文章引用: 陈道品, 邱明明, 石俏, 徐远科, 时云月. 激光诱导击穿光谱对绝缘子污秽元素组成和含量的快速原位检测[J]. 智能电网, 2025, 15(4): 95-100. DOI: 10.12677/sg.2025.154010

systems. Traditional fouling detection methods have problems such as inconvenient operation and the inability to perform online *in-situ* detection. In this study, the Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) technology was applied to detect the elemental composition and content of insulator fouling. A remote detection system was constructed to carry out laser excitation on multiple points of the insulator sample surface at a distance of 3 meters, so as to obtain spectral information and conduct qualitative and quantitative analysis. The results demonstrate that the LIBS can effectively detect multiple elements in contaminants in a non-contact manner, including Al, Si, Na, Mg, and Ca. Quantitative analysis of these elements was achieved using the standard curve method, with R^2 values exceeding 0.85 for all calibration curves. The relative standard deviations (RSD) for quantitative determination of Ca and Mg were 5.58% and 9.78%, respectively. Based on quantitative contaminant composition analysis, a technical framework for contaminant management and source tracing can be established using elemental composition data. Combined with regional environmental data, this system can analyze the distribution and migration patterns of pollution sources, providing a scientific basis for decision-making in designing anti-pollution flashover measures for power systems and comprehensive environmental pollution control in regional areas.

Keywords

LIBS, Insulator Fouling, Elemental Analysis, Quantitative Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

绝缘子在电力系统中既起到电气绝缘的作用, 又起到机械固定的作用, 是确保电力系统安全、稳定和高效运行的关键组件。当绝缘子表面沉积污秽后, 将导致绝缘性能下降, 严重时会发生闪络现象, 这严重影响了电力系统的可靠性[1]-[4]。目前最常用的测污方法是将线路停电后, 检修人员攀爬输电杆塔至绝缘子串上擦拭其表面污秽采样, 通过在实验室仪器分析测量等值盐密和灰密来确定污秽等级[5][6], 但这种传统的检测方式需要停电作业, 成果反馈速度慢, 无法及时指导电力行业相关生产。

随着智能电网对设备状态监测的实时性、精准性要求不断提升, 开发非接触式、在线原位的污秽检测技术成为行业迫切需求。激光诱导击穿光谱(LIBS)技术凭借其快速多元素分析、远程检测、无需样品预处理等优势, 在材料成分分析领域已展现出显著的应用潜力[7]-[10]。该技术通过高能激光脉冲激发样品表面产生等离子体, 利用光谱仪采集特征谱线实现元素定性定量分析, 可在不接触绝缘子的情况下完成污秽成分的原位检测, 为解决传统方法的痛点提供了新思路。

本研究聚焦 LIBS 技术在绝缘子污秽检测中的工程化应用, 通过利用远程检测系统, 在 3 米距离下实现污秽中多元素的同步识别与定量分析, 旨在建立一套高效、安全的污秽状态评估体系, 为电力系统防污闪策略制定及区域环境污染治理提供科学依据, 研究成果有望推动 LIBS 技术从实验室研究向现场在线监测的转变。

2. 实验样品与方法

2.1. 绝缘子污秽样品

本研究以佛山地区输电线路的玻璃绝缘子串为污秽附着载体, 其型号为 U160BS。该型号绝缘子具有良好的机电性能和抗污闪能力, 被广泛应用于当地输电网络。人工绝缘子污秽物的制备采用模拟化学成

分复配方法，以二氧化硅和氧化铝模拟污秽中的不溶物成分，选用氯化钠、氯化镁、氯化钙作为可溶性盐的模拟物质。为保证实验结果的可比性，所有人工绝缘子污秽样品的总质量均设定为统一标准值，通过调整各物质的配比，构建不同成分比例的污秽样本体系。人工污秽样品中元素含量信息如表 1 所示。

Table 1. Element content of artificial fouling samples
表 1. 人工污秽样品元素含量

	Al	Si	Na	Mg	Ca	Cl	O	S
S1	2.21	38.96	1.64	0.84	1.51	5.19	48.55	1.11
S2	4.41	31.17	3.28	1.68	3.01	10.39	43.85	2.22
S3	44.12	1.95	1.64	0.84	1.51	5.19	43.65	1.11
S4	35.29	3.90	3.28	1.68	3.01	10.39	40.24	2.22
S5	0	46.8	0	0	0	0	53.2	0
S6	52.9	0	0	0	0	0	47.1	0

具体制备过程如下：首先，根据预设配比，使用高精度电子天平(精度 0.001 g)准确称量各化学物质；随后，将称量好的物质置于行星式球磨机中，设定转速为 300 r/min，研磨时间为 60 min，通过球磨机的高速运转实现各物质的充分混合，确保污秽样本的均匀性；最后，采用定量涂刷法将混合均匀的污秽物涂覆于绝缘子表面，确保每片绝缘子表面污秽物附着量一致。

2.2. 远程 LIBS 装置

本研究所用远程 LIBS 系统包括脉冲激光器、卡塞格林望远镜系统、光谱仪以及控制系统。激光器采用 Nd:YAG 脉冲激光器，工作波长为基频 1064 nm，单脉冲能量 40 mJ，脉冲宽度 6 ns，工作频率 10 Hz。望远物镜口径 130 mm，焦距 650 mm。实验装置可通过调整镜头焦距实现对不同距离下样品的光谱激发。采用平面光栅多通道光谱仪收集等离子光谱。

2.3. 元素定量方法

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术基于高能激光脉冲与样品相互作用产生等离子体，通过分析等离子体发射光谱中元素特征谱线的强度实现元素定性与定量分析。其中，标准曲线法作为 LIBS 技术中最常用的定量分析手段，通过建立已知浓度标准样品的光谱强度与对应元素浓度的数学关系，实现未知样品的元素定量测定。

标准曲线法的实施过程包含三个核心步骤：首先，制备一系列具有不同已知元素浓度的标准样品，各标准样品需严格控制基质成分与未知样品一致，以减少基体效应干扰；其次，使用 LIBS 系统对每个标准样品进行多次光谱采集，记录目标元素特征谱线的平均强度；最后，以元素浓度为横坐标、光谱强度为纵坐标绘制标准曲线，通常采用最小二乘法拟合得到线性回归方程 $y = ax + b$ (其中 y 为光谱强度， x 为元素浓度， a 、 b 为拟合参数)。分析未知样品时，通过测量其光谱强度并代入标准曲线方程，即可计算出目标元素浓度。

3. 结果与讨论

在自然污秽检测中，激光诱导击穿光谱(LIBS)技术展现出强大的多元素同步检测能力。通过在 3 米检测距离下对绝缘子表面自然污秽的多个点位进行激光激发，获取的光谱图中清晰呈现出各元素的特征

谱线: Al 元素在 309.27 nm 处、Si 元素在 288.15 nm 处、Na 元素在 589.59 nm 处、Mg 元素在 280.27 nm 处、Ca 元素在 422.67 nm 处均有明显谱线分布, 这为五种元素的存在提供了直接依据(图 1)。

针对上述元素的定量分析, 研究采用标准曲线法构建检测体系, 对不同的绝缘子人工污秽使用 LIBS 进行光谱采集, 以元素浓度为横坐标、特征谱线平均强度为纵坐标绘制定标曲线(如图 2 所示), 经最小二乘法拟合得到线性回归方程。将自然污秽样品的实测光谱强度代入对应方程, 即可精准计算各元素含量, 该方法通过非接触式检测避免停电作业, 为绝缘子污秽中多元素的原位定量分析提供了高效技术路径, 后续可结合元素含量数据构建污秽治理与溯源体系。

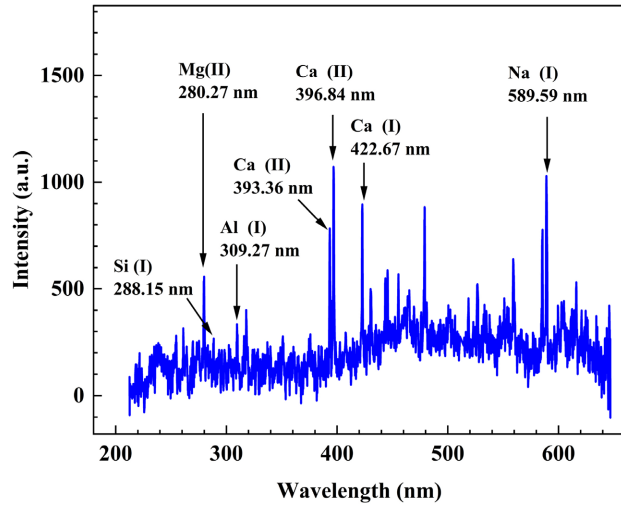


Figure 1. Spectrum diagram of natural insulator fouling
图 1. 绝缘子自然污秽的光谱图

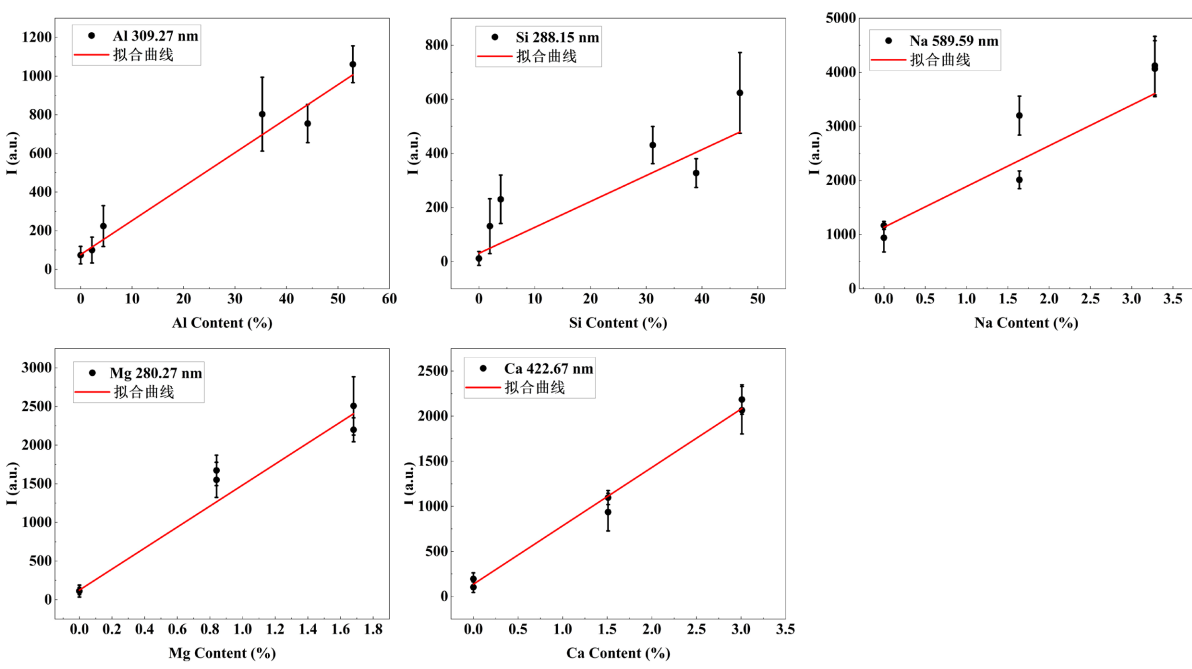


Figure 2. Fouling element calibration curve based on artificial fouling
图 2. 基于人工污秽的污秽元素定标曲线

Table 2. Element quantitative curve equations and linear coefficients
表 2. 元素定量曲线方程和线性系数

元素	a	b	R ²
Al	17.58	76.5	0.98
Si	9.58	30.72	0.85
Na	753.34	1134.37	0.87
Mg	124.65	1358.53	0.97
Ca	647.55	136.23	0.99

基于上述定量方程(表 2)，开展对人工污秽中元素的定量分析验证，定量分析结果如表 3 所示。实验结果显示，远程 LIBS 装置的定量分析结果偏差满足要求，具备较好的应用潜力。

Table 3. Quantitative detection results of metal elements in fouling
表 3. 污秽中金属元素的定量检测结果

序号	Ca 元素测试值(%)	Ca 元素真实值(%)	Mg 元素测试值(%)	Mg 元素真实值(%)
1	4.22	4.50	8.87	8.40
2	4.66		8.24	
3	4.33		8.06	
4	4.08		8.99	
5	4.65		7.5	
6	4.65		9.0	
7	4.2		9.08	
8	4.65		7.52	
9	4.14		6.84	
10	4.19		7.52	
平均值	4.38		8.16	
标准差	0.24		0.8	
相对标准偏差	5.58		9.78	

4. 结论

本研究通过远程 LIBS 技术，成功实现了绝缘子表面自然污秽中 Al、Si、Na、Mg、Ca 等多元素的非接触式原位检测。实验结果表明，在 3 米检测距离下，LIBS 系统可通过特征谱线(如 Al 309.27 nm、Si 288.15 nm)准确识别污秽元素组成，并基于标准曲线法定量分析元素含量，各元素定量曲线的 R² 都超过 0.85。与传统方法相比，该技术无需停电和人工采样，显著提升了检测效率与安全性，为绝缘子污秽等级的原位检测提供了一种潜在的解决方案，未来将聚焦在远程 LIBS 定量准确度提升上，更好地服务于实际场景下的绝缘子测试。

基金项目

创新科技项目(GDKJXM20230903)资金资助。

参考文献

- [1] 李俊男. 风电场集电线路隐患放电识别特性研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(9): 134-137.
- [2] 李成学, 何文辉, 李宁, 等. 扬尘条件下带电污秽颗粒对绝缘子电位和电场分布的影响研究[J]. 机电信息, 2024(23): 26-29.
- [3] 白张, 岳嵩, 王浩, 等. 污秽分布对绝缘子串温度场影响[J]. 电工技术, 2023(23): 185-188.
- [4] 王亚平, 李智辉, 阿思亚, 等. 高电场下直流绝缘子表面积污特性研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(8): 78-84.
- [5] 杨征, 王海燕, 陈硕, 等. 不同盐密灰密对环氧树脂绝缘件污秽闪络特性影响研究[J]. 河南电力, 2019(S1): 52-55.
- [6] 白璐, 高嵩, 温涛源, 等. 徐州水泥污秽区悬挂绝缘子的污秽物特性[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 107-113.
- [7] 杏艳, 李茂刚, 念娟妮, 等. 激光诱导击穿光谱结合机器学习的土壤沉积物重金属元素定量分析方法研究[J]. 分析测试学报, 2025, 44(6): 1115-1122.
- [8] 孙兰香, 于海斌. 利用激光诱导击穿光谱对铝合金成分进行多元素同时定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3375-3378.
- [9] 王乃啸, 王希林, 覃歆然, 等. 激光诱导击穿光谱结合 CARS-PLSR 法快速定量检测绝缘子污秽[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1378-1386, 1428.
- [10] 李勋, 吕启深, 艾精文, 等. 基于激光诱导击穿光谱的装置参数优化与硅橡胶材料的主组分分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 72-76, 93.